

CONSIDERACIONES SOBRE EL CALCULO SISMICO DE PRESAS-BOVEDA

E. Alarcón y J. Domínguez

E.T.S.I.I., c/ José Gutierrez Abascal, 2, 28006-Madrid

E.T.S.I.I., Av. Reina Mercedes s/n, 41012- Sevilla.

RESUMEN

En esta comunicación se ponen de manifiesto las características que debe reunir un modelo para el cálculo sísmico de presas-bóveda. Se analizan los factores locales que influyen sobre la sollicitación sísmica que actúa en una ubicación concreta. Se destaca la importancia que en el comportamiento sísmico de estas construcciones tiene la interacción entre presa, suelo y embalse los cuales constituyen un único sistema dinámico que se ve afectado por factores tales como: la geometría de la presa y el vaso, las propiedades del suelo, la posible falta de homogeneidad subterránea y la presencia de sedimentos de fondo. A la luz de los anteriores factores y en general de las características propias de las presas-bóveda, el suelo y los embalses, se discuten las posibilidades que ofrecen y los inconvenientes que tienen algunos de los modelos de Elementos Finitos existentes. Se presenta un modelo de Elementos de Contorno que, por las características propias de este método, resulta muy adecuado.

1. INTRODUCCION

La escala de construcción, la importancia social y los efectos catastróficos que pueden producirse en el caso de colapso, convierten las presas en estructuras singulares cuyo estudio merece un tratamiento cuidadoso y exhaustivo. Por ello, generalmente, las presas-boveda construidas son muy seguras y han demostrado su idoneidad frente a la acción sísmica en muchas ocasiones (Priscu, 1985). Ello no debe inducir a subestimar la importancia del estudio dinámico de la estructura, mucho

más si se tiene en cuenta que la mayoría de los estudios realizados (vg. Clough et al. 1973) demuestran que las tensiones dinámicas inducidas son del mismo orden que las provocadas por la presión hidrostática.

El problema sin embargo no es sencillo. En el modelado del sistema (Figura.1) deben incluirse el terreno, el embalse, la estructura e incluso los sedimentos (Shul'man, 1987) que son importantes para explicar las diferencias entre los análisis teóricos y los valores obtenidos en experimentos. Debido a esto, la Normativa suele contener indicaciones muy sumarias que no recogen los espectaculares avances registrados en la ingeniería sísmica cuantitativa en los últimos años. Estos avances se han producido tanto en los métodos numéricos (Elementos Finitos, Elementos de Contorno) implementables en ordenador para representar variadísimas situaciones físicas, como en los procedimientos de cálculo dinámico que convierten en una tarea rutinaria la determinación de modos y frecuencias propias, análisis no lineales, cálculo de espectros, etcetera, a un nivel que no podía ser imaginado hace tan sólo veinte años. Por si fuera poco, el uso masivo de acelerómetros capaces de registrar terremotos fuertes ha permitido conocer más a fondo el fenómeno sísmico con lo que su descripción de cara a la aplicación ingenieril ha mejorado de tal manera que la mayoría de las Normas Sísmicas vigentes han quedado rápidamente obsoletas. El artículo que se presenta pretende resumir algunas ideas sobre los puntos que se estiman mas importantes en el cálculo sísmico de presas; y en especial, la aplicación de métodos recientes de cálculo a los problemas de interacción dinámica fluido-suelo-estructura.

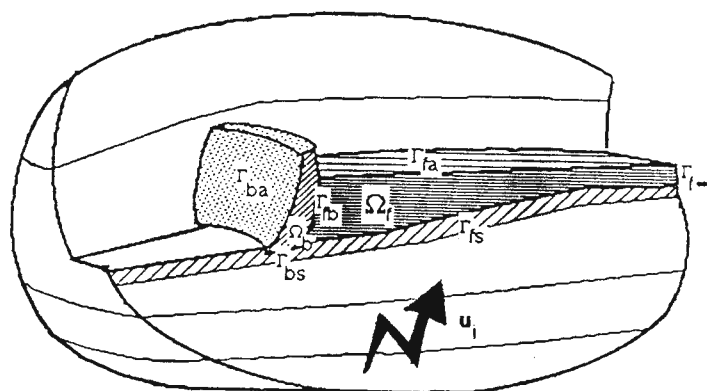


Figura 1. Esquema del sistema en estudio

2. MODIFICACION DE LAS ACCIONES SISMICAS DE CAMPO LIBRE EN RELACION CON LAS CARACTERISTICAS TOPOGRAFICAS, GEOLOGICAS Y GEOTECNICAS DEL EMPLAZAMIENTO

La influencia de las características geotécnicas del emplazamiento sobre el movimiento de la superficie libre ha sido puesta de manifiesto muy claramente tanto por estudios teóricos como por registros experimentales de terremotos. Esto ha dado lugar a la adopción, por parte de las normas sismorresistentes de distintos países, entre ellos España, de modificaciones en la sollicitación de diseño teniendo en cuenta tales propiedades.

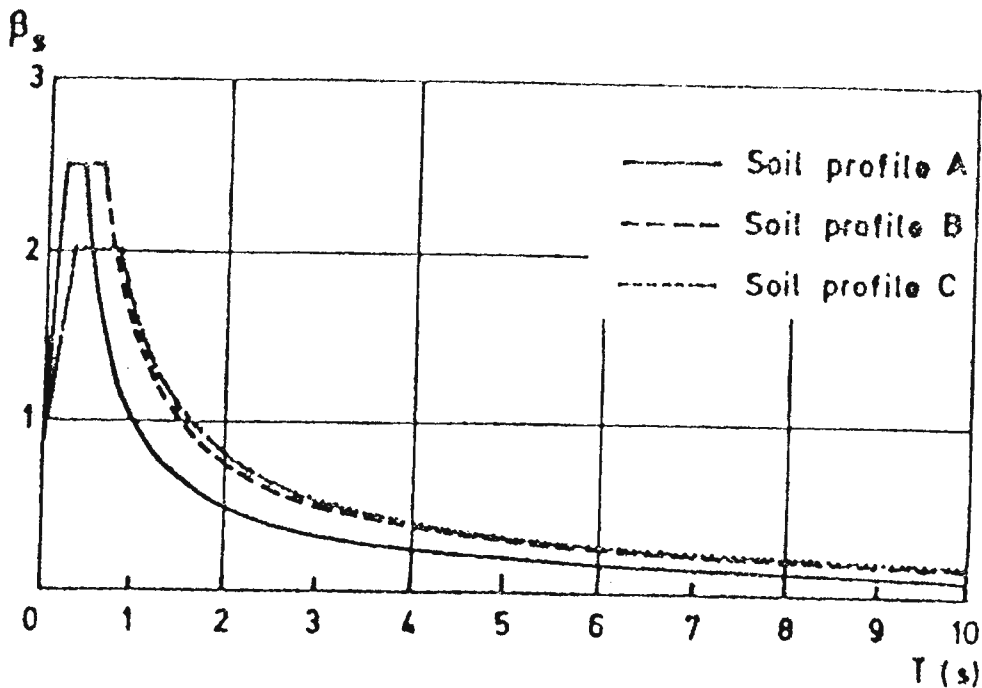


Figura 2. Espectro dependiente del tipo de terreno según el EUROCODIGO

La Figura 2 recoge la comparación del espectro medio de diseño de Newmark con los espectros dependientes del tipo de terreno propuesto por el Eurocodigo Sísmico (1980). Puede observarse que el suelo A (roca) responde desplazando los máximos hacia los periodos mas bajos, lo cual es pertinente para el estudio de la estructura de la mayoría de grandes presas.

De acuerdo con los resultados teóricos, la difracción de ondas sísmicas por irregularidades topográficas puede generar grandes variaciones del

movimiento en puntos situados entre sí a distancias cortas (Bouchon, 1973). La experiencia de los efectos destructores de algunos terremotos así lo demuestra. Este es el caso del terremoto del sur de Italia el 23 de Noviembre de 1980, donde se observaron incrementos de aceleración debidos a la topografía de hasta dos grados en la escala MSK (Siro, 1980). Desgraciadamente no existen en el día de hoy registros que permitan evaluar directamente los efectos de la amplificación topográfica, y esto dificulta la elaboración de criterios de diseño que puedan ser introducidos en las normas. Sin embargo, la certeza de la importancia de estos efectos, hace necesaria su consideración, por los procedimientos disponibles, para las grandes estructuras como presas, puentes o centrales eléctricas.

El interés de estos aspectos es tal que el Eurocódigo Sísmico (1980) en una de sus primeras versiones proponía fórmulas concretas relacionadas con la inclinación del terreno o los accidentes intermedios. Dependiendo de la pendiente del terreno se admitía que podían producirse mayoraciones de hasta un 30%, respecto a los valores del espectro de campo libre. Los desplazamientos relativos entre puntos separados por un valle de profundidad superior a diez metros se estimaban en un 50%.

Por otro lado, las dimensiones de este tipo de estructuras imponen, incluso en campo libre, la consideración de posibles desplazamientos diferenciales. Considere por ejemplo el periodo de 0.2 sg. para el que se produce el máximo del espectro en suelo rocoso. Una velocidad típica de propagación de las ondas S en estos medios sería del orden de 2500 m/sg para la cual, la longitud de onda asociada es de 500m. Esto indica que en distancias del orden de 125 m se pueden producir grandes desplazamientos relativos.

En los últimos veinte años se han publicado numerosos artículos sobre el problema de la difracción de ondas sísmicas por irregularidades topográficas. Entre estos trabajos pueden citarse como más importantes los de Boore (1972), Trifunac (1973), Wong y Trifunac (1974), Sánchez-Sesma y Rosembueth (1979), Lee (1982), Sánchez-Sesma (1983). Estos estudios, referentes a formas topográficas sencillas, muestran que el movimiento es muy dependiente de la geometría general del problema, de

la posición del punto de observación, del tipo de onda incidente, de la frecuencia de la sollicitación y del ángulo de incidencia de las ondas. La importancia de la topografía en general y de los factores antes indicados, da lugar a unos movimientos muy dependientes de la geometría real del emplazamiento, así como de la ubicación y forma concreta de la construcción en estudio. Se hace pues necesario, para una estimación lo más realista posible de las acciones, realizar un modelo del emplazamiento, que incluya los accidentes topográficos cercanos más importantes. Este modelo no puede, generalmente ser realizado con elementos finitos tridimensionales por lo que el Método de los Elementos de Contorno, que sólo requiere la discretización de la superficie del medio, se presenta como una alternativa atrayente que recoge eficazmente los efectos tridimensionales.

3. INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS GEOLOGICAS Y GEOTECNICAS

Además de la topografía, y en muchos casos en mayor medida, tienen importancia las características geológicas y geotécnicas del terreno. Como se ha indicado anteriormente no solo es importante el tipo de suelo inmediatamente debajo de la construcción, sino también lo son las propiedades y disposición geométrica de las zonas de materiales diferentes que puedan existir en el subsuelo próximo al emplazamiento.

El efecto de estos factores es doble, por una parte, influyen sobre la respuesta de la presa debido a la interacción dinámica entre el suelo deformable y la estructura, y por otra, influyen sobre la sollicitación sísmica como consecuencia de difracciones y reflexiones previas. El primero de estos efectos será considerado al hablar de los criterios de modelado del sistema dinámico para su estudio teniendo en cuenta la deformabilidad del suelo. El segundo será analizado brevemente a continuación.

Los primeros estudios de la influencia de las características geotécnicas del emplazamiento tenían en cuenta únicamente las propiedades del suelo en la vertical del punto de ubicación de la construcción y hacían la hipótesis de que el perfil se extendía uniformemente hasta el infinito en las direcciones horizontales. Esto supuso un avance importante y dio

lugar a numerosos estudios de amplificación local que fueron tenidos en cuenta en los códigos de diseño. Más tarde, coincidiendo en el tiempo con los estudios de la influencia de la topografía, se han estudiado los efectos de las propiedades geológicas y geotécnicas de una zona más amplia, próxima al emplazamiento, en la cual pueden darse variaciones de las características del subsuelo. Los trabajos de Wong y Trifunac (1974), Sánchez-Sesma y Esquivel (1979), Dravinsky (1982), y Domínguez y Abascal (1987, 1989) han puesto claramente de manifiesto la gran influencia que la variación de las propiedades del subsuelo en zonas próximas al emplazamiento tiene sobre la amplificación local. Así se ha comprobado que en emplazamientos con inhomogeneidades subterráneas puntos a poca distancia sobre la superficie del suelo pueden presentar movimientos bien distintos.

Los estudios antes citados se refieren fundamentalmente a depósitos aluviales y a estratigrafías con un cierto ángulo de buzamiento. Del conjunto de ellos puede extraerse la conclusión de que un modelo realista ha de tener en cuenta la geometría de las discontinuidades subterráneas que eventualmente existan en una zona relativamente amplia próxima al emplazamiento. Únicamente así se tendrá una evaluación fiable de la acción sísmica en un lugar concreto.

Debe señalarse que todos los estudios indicados hasta el presente son o bien de tipo analítico sobre modelos simples (problema antiplano de ondas SH), o incluyen una formulación integral que es resuelta en forma numérica. Esto último es realizado mediante el Método de los Elementos de Contorno o algún procedimiento similar.

Como consecuencia de lo anteriormente dicho respecto a la importancia de las características topográficas, geológicas y geotécnicas de la zona del emplazamiento se considera necesaria la realización de un modelo para el estudio sísmico que incluya todos estos aspectos de una zona circundante a la construcción. El Método de los Elementos de Contorno es el más adecuado para incorporar de forma sencilla las variaciones de geometría superficial, las discontinuidades subterráneas y los dominios de grandes dimensiones o infinitos. Estas características son debidas a que la dimensión geométrica del problema es reducida en una unidad al trasladar

la resolución al contorno.

4. CRITERIOS DE MODELADO DINAMICO DEL SISTEMA SUELO-PRESA-EMBALSE

Las numerosas investigaciones llevadas a cabo en las dos últimas décadas ponen de manifiesto las siguientes consideraciones:

a) El estudio de la respuesta sísmica de una presa no puede realizarse separadamente de los elementos con los que interaccionan suelo, embalse, sedimentos.

b) La deformabilidad del suelo influye sustancialmente sobre la respuesta de la presa debido no sólo a la interacción directa entre suelo y presa, sino también a la modificación de las presiones hidrodinámicas respecto a las que aparecerían si el fondo del embalse fuera rígido.

c) La presión hidrodinámica ejercida por el embalse tiene una gran importancia y se ve influida en gran medida por la topografía del fondo (sobre todo en las proximidades de la presa), la antes mencionada deformabilidad del suelo, la geometría del vaso y los sedimentos.

d) Los anteriores factores, por su importancia, deben ser tenidos en cuenta a la hora de realizar el análisis sísmico de una presa.

Algunas de las publicaciones más relevantes, posteriores a 1980, de las que se deducen las anteriores conclusiones son las que Chopra y Chakrabarti (1981), Hall y Chopra (1983), Fenves y Chopra (1983, 1984, 1985). En particular deben señalarse los estudios, en la que se basan las consideraciones indicadas anteriormente, puede concluirse igualmente, en lo que se refiere a presas de bóveda, que los efectos de la interacción agua-presa y de la absorción de ondas en el fondo y contorno del embalse tienen más importancia que en las de gravedad y no deben ser olvidados en ningún caso. Un modelo que no contemplara estos factores estaría representando un problema muy distinto del real y del que sería no solo arriesgado, sino absurdo extraer conclusiones. Como se concluye en el estudio de presas de bóveda que Fok y Chopra (1986 c) los efectos de la interacción dinámica agua-presa y suelo-agua-presa dependen en parte del

problema particular en estudio.

4.1. Modelo de la presa

El modelo de la presa debe ser realizado con elementos finitos o elementos de contorno pero teniendo presente que deben ser elementos que hagan una buena representación del comportamiento de flexión de la bóveda. Esto se cumple en el caso de elementos finitos con los elementos de lámina gruesa, y cuando la geometría lo permita, de lámina delgada. No ocurre así con los elementos tridimensionales de tipo elemental (Zienkiewicz, 1980). En el caso de elementos de contorno estos deben ser de tipo parabólico.

4.2. Modelo del agua embalsada

Este modelo puede ser realizado con elementos finitos en una región próxima a la bóveda acoplados con elementos de tipo infinito para así poder considerar el conjunto del embalse con un coste no desorbitado (Fok y Chopra, 1986 a, 1986 b). Una mejor representación de la geometría del embalse se puede alcanzar haciendo uso de elementos de contorno que permiten modelar todo el contorno del vaso con un número de elementos "manejable" (Aubry y Crepel, 1986). En cualquiera de los dos casos, el modelo del agua debe ser acoplado con los de la presa y el suelo.

En la Figura 3 se incluye una discretización con elementos de contorno realizada en un embalse de Electricité de France por Aubry y Crepel (1986).

4.3. Modelo del suelo

Teniendo en cuenta los valores relativos entre los módulos de Young de los hormigones y las rocas habituales de apoyo, es imprescindible modelar la deformabilidad de ésta para el estudio acoplado de la presa y el medio en que está cimentada. Esto puede ser realizado mediante elementos finitos aunque con grandes simplificaciones (pocos elementos y sin masa) (Fok y Chopra, 1986, a) debido al gran número de elementos que requiere cualquier discretización tridimensional de un medio muy extenso.

En este caso se requieren elementos de transición entre los elementos láminas y los tridimensionales del suelo.

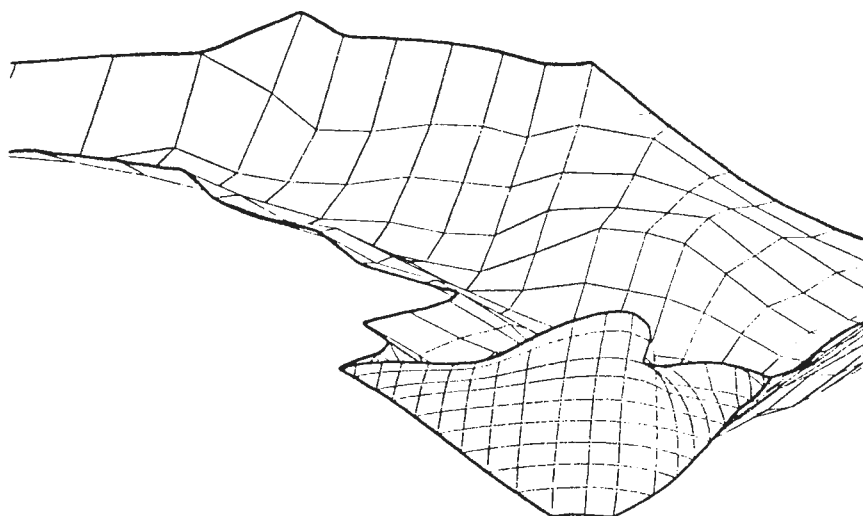


Figura 3. Modelo de un embalse mediante elementos de contorno

Los modelos desarrollados por Chopra y sus colaboradores para los casos bidimensionales y tridimensionales constituyeron un gran avance pero presentan algunas incorrecciones importantes : a) La interacción entre el agua y la base no es representada rigurosamente y requiere la estimación de un factor de absorción empírico, que en caso de existir sedimentos de fondo es muy incierto; b) La base ha de ser necesariamente un semiespacio elástico sin que puedan ser tenidos en cuenta tipos de suelos no homogéneos; c) En el modelo tridimensional ocurre además como se ha dicho anteriormente que el número de grados de libertad crece desmesuradamente y por ello, para reducir dificultades, los elementos finitos que representan el trozo de suelo más cercano a la presa se suponen de densidad nula, con la consiguiente pérdida de precisión.

Lotfi, Roesset y Tassoulas (1987) desarrollaron más recientemente para el caso bidimensional un modelo de elementos finitos que permite tener en cuenta de una manera rigurosa la interacción entre el agua y su base y que es válido para situaciones en las que el suelo puede ser considerado como uno o varios estratos que se asientan sobre una base infinitamente rígida. Este modelo, sin embargo, no puede tener en cuenta bases de tipo semiespacio no acotado y requiere el uso de unos contornos absorbentes en el suelo no siempre disponibles ni fáciles de implementar.

Un modelo de elementos de contorno resuelve los inconvenientes antes citados y permite representar con fidelidad el sistema completo formado por presa, agua y base. Puede representar con precisión la topografía de una zona amplia del suelo y tiene en cuenta de una manera rigurosa la interacción entre el medio líquido y los sólidos (presa y base) acoplando ambos medios con las condiciones de equilibrio y compatibilidad de movimientos. Además, permite incluir fácilmente los sedimentos de fondo. La base puede ser tanto un semiespacio viscoelástico, como en el modelo de Chopra pero sin simplificaciones respecto a la inercia, o un conjunto de estratos, como en el modelo de Lotfi, pero sin que éstos tengan que estar sobre una base infinitamente rígida. Estudios de este tipo para dominios bidimensionales realizados con elementos de contorno han sido presentados por Medina y Domínguez (1989), Domínguez y Medina (1989), y Medina, Domínguez y Tassoulas (1990).

En conclusión puede indicarse que en cualquier caso debe realizarse un estudio de las respuestas sísmicas empleando un modelo que contemple el comportamiento dinámico acoplado del sistema suelo-presa-embalse ya que existe una interacción mutua que modifica de manera importante el comportamiento que tendría la presa si fuera estudiada aisladamente.

5. ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS DE CONTORNO DE UN PROBLEMA BIDIMENSIONAL

A continuación se presentan algunos resultados del estudio de la respuesta sísmica de un modelo bidimensional de una presa de gravedad realizado mediante elementos de contorno con el fin de compararlo con otros anteriores realizados mediante elementos finitos. La geometría y las propiedades de los materiales son las mismas que anteriormente habían sido utilizadas por Chopra y sus colaboradores y por Lotfi, Roesset y Tassoulas (1987) para sus estudios de elementos finitos. La geometría del problema se muestra en la Figura 4 en la que H , B , H_w , H_s y H_f indican respectivamente, la altura de la presa, el ancho de su base, la profundidad de agua, la de los sedimentos y la profundidad de un estrato que pudiera existir en el suelo. Esta última cota no es de aplicación en el caso de base tipo semiespacio homogéneo. La sección de

la presa es triangular con una relación $B/H = 0.8$. Las propiedades de los materiales son: a) Presa; Módulo de elasticidad = 27.5 GPa, Módulo de Poisson = 0.2, amortiguamiento de tipo histerético = 0.05 y densidad = 2.48 Kg/m^3 , b) base rocosa; Módulo de elasticidad = 27.5 GPa, Módulo de Poisson = 0.3333, amortiguamiento de tipo histerético = 0.05 y densidad = 2.64 Kg/m^3 . En la Figura 5 se muestra el modelo de elementos de contorno empleado para el estudio.

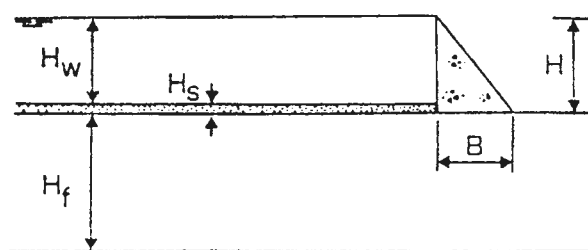


Figura 4. Sección para el estudio sísmico de una presa de gravedad.

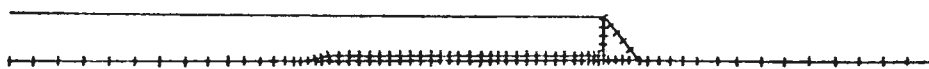


Figura 5. Modelo de elementos de contorno para un problema bidimensional.

En la figura 6 se puede ver el desplazamiento de la cresta de la presa cuando el embalse está vacío ante un desplazamiento horizontal de la base, que se supone rígida, en función de la frecuencia de la sollicitación, que ha sido adimensionalizada con la primera de resonancia. Los resultados muestran la gran eficacia de los elementos de contorno de tipo parabólico frente a los elementos finitos de tipo no conforme empleados por Chopra, Lotfi y sus colaboradores respectivos.

En la Figura 7 se representan algunos resultados correspondientes a un problema más complejo en el que el embalse está lleno y la base es de roca deformable. La sollicitación corresponde a un tren de ondas de tipo P propagándose verticalmente. Se comparan resultados con los de Fenves y Chopra(1984) para los cuales se representan valores obtenidos con tres

coeficientes de absorción diferentes. El valor de este coeficiente tiene que ser estimado empíricamente como se indicó anteriormente y como se aprecia en la figura los resultados son muy dependientes de él.

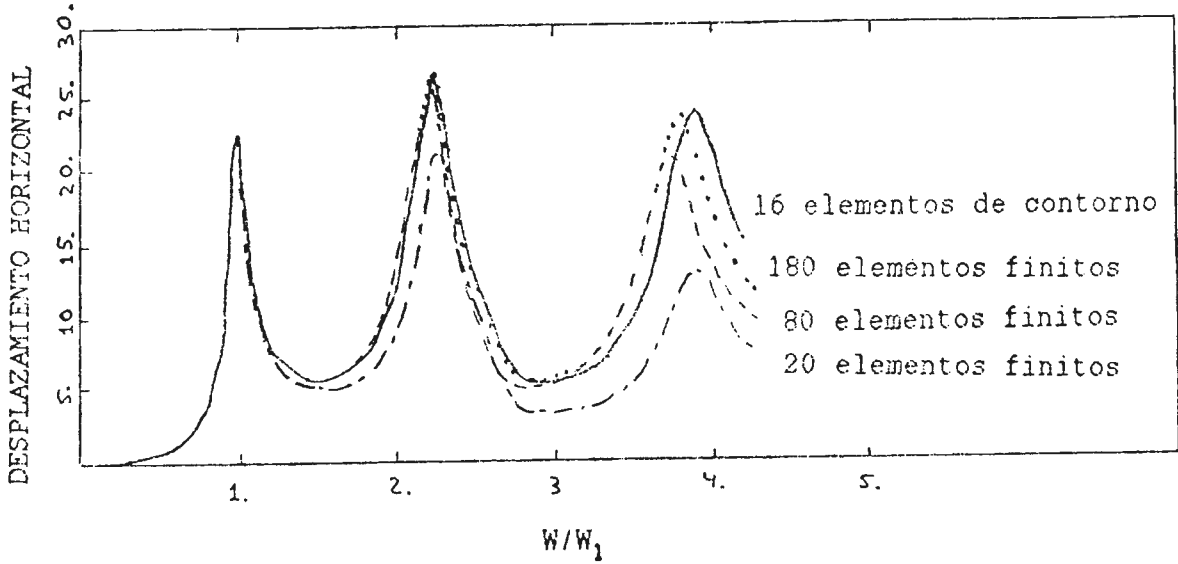
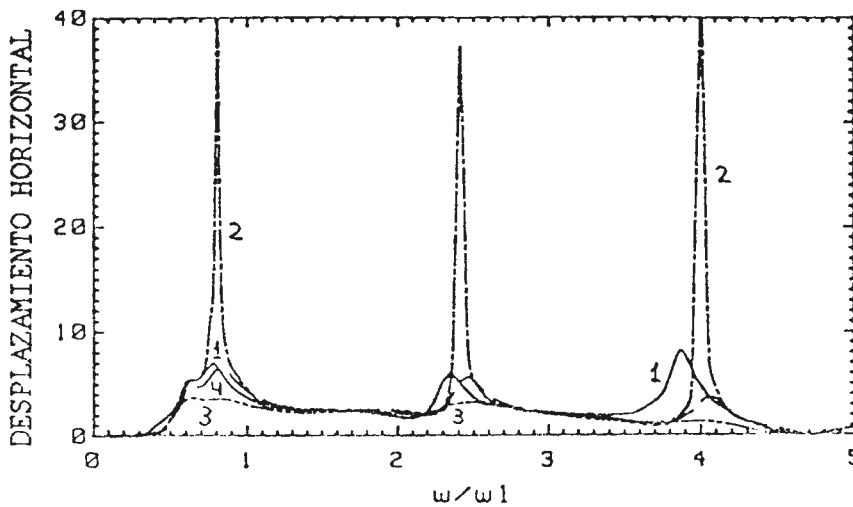


Figura 6. Respuesta sísmica de una presa sobre base rígida. Embalse vacío. Solicitación horizontal.



1- MEC; 2- MEF, $\alpha = 1.$; 3- MEF, $\alpha = 0.5$, 4- MEF, $\alpha = 0.75$

Figura 7. Respuesta sísmica de una presa sobre base deformable de tipo semiespacio uniforme. Embalse lleno. Solicitación vertical.

En los artículos de Domínguez y Medina(1989) y Medina, Domínguez y Tassoulas(1990) puede encontrarse un estudio amplio de el modelo bidimensional de la Figura 4 en el cual se analizan los distintos factores que influyen en el sistema, se comparan resultados con los de elementos finitos y se pone de manifiesto la fiabilidad de los elementos

de contorno para este tipo de problemas.

6. CONCLUSIONES

El estudio de la respuesta sísmica de una presa debe realizarse de acuerdo con los siguientes requisitos:

a) El sistema suelo-presa-embalse debe ser analizado en su conjunto ya que la interacción entre los tres medios altera sensiblemente el comportamiento que tendría la presa sólo o interaccionando con uno solo de los medios.

b) El modelo de la presa debe realizarse con elementos que representen bien su comportamiento de flexión. No deben emplearse elementos tridimensionales simples.

c) El suelo debe ser considerado con su topografía, propiedades y discontinuidades locales, tanto para definir la sollicitación de diseño como para analizar la respuesta del sistema.

d) La geometría del fondo del embalse y los posibles sedimentos de fondo deben ser incluidos en el modelo en forma adecuada.

e) El Método de los Elementos de Contorno es una herramienta muy adecuada para este tipo de análisis.

7. REFERENCIAS

1. Aubry, D., Crepel, J.M. (1986) " Interaction sismique fluide-structure. Application aux barrages route". Congres Français Génú Parasismique, pp.1-12.
2. Boore, D.M. (1972) " A note on the effect of simple topography on seismic SH waves". Bull. Seis. Soc. Am., Vol.62, PP. 275-284.
3. Bouchon, M. (1973) " Effects of topography on surface motion" Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 63, pp.615-632.
4. Clough, R.; Raphael, J.M.; Mojtahedi, S. (1973) "ADAP. A computer program for static and dynamic analysis of arch dams". Report N° EERC

73-14, June.

5. Chopra, A.K. and Chakrabarti, P. (1981) " Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction" *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol.9, pp.363-383.
6. Dominguez, J. and Abascal, R. (1987) " Effects of an irregular soil profile on site amplification" *Proc. 3rd Soil Dynamics and Earthquake Eng. Conf.*, A. Cakmak and C.A. Brebbia, Ed., Elsevier.
7. Dominguez, J. and Abascal, R. (1989) " Seismic response of strip footings on zoned viscoelastic soils". *J. Eng. Mech. ASCE*, Vol.115, pp.913-934.
8. Dominguez, J. and Medina, F. (1989) "Boundary elements for the analysis of dams including dam-water-foundation interaction effects. II", *Eng. Analysis with Boundary Elements*, Vol.6, pp.158-163.
9. Dravinsky, M. (1982) "Scattering of SH waves by subsurface topography", *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, Vol.108, pp.1-31.
10. Fenves, G. and Chopra, A.K. (1983), "Effects of reservoir bottom absorption on earthquake response of concrete gravity dams", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol.11, pp.809-829.
11. Fenves, G. and Chopra, A.K. (1984), "Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction and reservoir bottom absorption ". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol.12, pp.663-680.
12. Fenves, G. and Chopra, A.K. (1985), "Effects of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction of frequency response functions for concrete gravity dams", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol.13, pp.13-31.
13. Fok, K.L. and Chopra, A.K. (1986), "Earthquake analysis of arch dams including dam-water-interaction reservoir boundary absorption and foundation flexibility", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol.14, pp.155-184.
14. Fok, K.L. and Chopra, A.K. (1986), "Frequency response functions for arch dams hydrodynamic and foundation flexibility effects", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol.14, pp.769-795.
15. Fok, K.L. and Chopra, A.K. (1986), " Hydrodynamic and foundation flexibility effects in earthquake response of arch dams", *J. Struct. Eng. ASCE*, Vol.112, pp.1810-1828.
16. Hall, J.F. and Chopra A.K. (1983), "Dynamic analysis of arch dams

- including hidrodynamic effects", J. Eng. Mech. Div. ASCE, Vol.109, pp. 149-163.
17. Lee, V.W. (1982), " A note on the scattering of elastic plane waves by hemispherical canyon", Soil Dyn. Earthquake Eng., pp.122-139.
 18. Lotfi,V., Roesset, J.M. and Tassoulas, J.L., (1987)" A technique for the analysis of the response of dams to earthquake", Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.15, pp.463-490.
 19. Medina, F. and Dominguez, J. (1989) "Boundary elements for the analysis of dams including dam-water-foundation interaction effects. I", Eng. Analysis with Boundary Elements, Vol.6, pp.151-157.
 20. Medina, F., Dominguez,J. and Tassoulas, J. L. (1990),"On the response of dams to earthquakes including the effects of sediments", J. Struct. Eng. ASCE, In press.
 21. Prisou ,R. Popovici, A., Stenatiu,D. and Stere, D. (1985), "Earthquake Engineering for large dams", J. Wiley.
 22. Sanchez-Sesma, F. J. (1983) "Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities", Bull. Seism. Soc. Am., pp.1621-1636.
 23. Sanchez-Sesma, F.J. and Esquivel ,J.A. (1979) " Ground motion on alluvial valley under incident plane SH waves", Bull. Seism. Soc. Am., pp.1107-1120.
 24. Sanochez-Sesma, F.J. and Rosenblueth, E. (1979) "Ground motion at canyons of arbitrary shape under incident SH waves", Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.7, pp.441-450.
 25. Siro, L. (1980), "Emergency microzonations by italian geodynamics proyeots after November 23 earthquake.A short technical report", Proc. 3rd Int. Conf. Microzonation, Seattle, Wash., Vol.3,1417-1427.
 26. Shul'man, S.G. (1987) " Seismic pressure of water on hydraulic structures", A.A. Balkema, Rotterdam.
 27. Trifunac, M.D. (1973), "Scattering of plane SH waves by a semicylindrical canyon", Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.1, pp.267-281.
 28. Wong, H.L. and Trifunac, M.D. (1974),"Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves", Bull. Seism. Soc. Am., pp.1389-1406.
 29. Zienkiewicz, O.C. (1980) " El método de los elementos finitos", Reverté, Barcelona.